

5. К вопросу о связи между предельными напряжениями в агломерате и его прочностью во вращающемся барабане / И.С. Берсеньев, В.А. Горбачев, В.И. Клейн, А.Ю. Петрышев, Ю.Г. Ярошенко // Сталь. 2013. № 1. С. 6-8.

6. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2003. – 400 с.

7. Влияние технологических режимов производства агломерата на его прочностные свойства при восстановлении / Т.В. Деткова, С.Е. Веселова // Научно-технический прогресс в металлургии – 2013: материалы международного научного семинара; отв. ред. Э.А. Гарбер, З.К. Кабаков, 2014. С. 18-24.

8. Изучение производительности агломашины и горячей прочности агломерата с использованием нейронных сетей / Реф. Л.И. Александров // Новости черной металлургии за рубежом. 2006. № 2. С. 28-30.

УДК 669.04

С. И. Кондрашенко, И. А. Прибытков

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ И АЭРОДИНАМИКА СТРУИ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ПО НОРМАЛИ С ОГРАНИЧИВАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Аннотация

В работе проведено исследование особенностей развития одиночной свободной струи азота, вытекающей при различной температуре, до и после взаимодействия с ограничивающей поверхностью. Исследования проводились на основании численного моделирования в версии программно-вычислительного комплекса FloEFD, основанного на решении уравнений газодинамики и теплообмена. Решаемая система уравнений состояла из уравнения Навье-Стокса, уравнений энергии и неразрывности и была дополнена k - ϵ моделью турбулентности.

При исследовании аэродинамики и теплообмена одиночной высокотемпературной струи, взаимодействующей с поверхностью, основными определяющими величинами являлись: скорость истечения азота из сопла U_0 , температура истечения азота T_0 , температура среды $T_{ср}$, в которую струя вытекает, внутренний диаметр сопла d_0 , расстояние от среза сопла до поверхности h , расстояние от критической точки (точки пересечения оси струи с поверхностью) по радиусу потока r .

Исследования показали, что при расчете процессов движения и теплообмена при струйном конвективном нагреве металла необходимо учитывать зависимость вязкости газа от температуры и от соотношения температур вытекающего из сопла газа и температуры среды, окружающей струю.

Ключевые слова: струйное течение, кинематический коэффициент вязкости, турбулизация потока, «атакующие» струи, веерный поток, численное моделирование, поля скоростей, критерий Рейнольдса, конвективный нагрев, конвективная теплоотдача.

Abstract

This paper a study was made of the features of the development of a single free nitrogen stream that flows at different temperatures, before and after interaction with the confining surface. The studies were carried out on the basis of numerical simulation in the version of the software-computing

complex FloEFD, based on the solution of the equations of gas dynamics and heat transfer. The system of equations to be solved consisted of the Navier-Stokes equation, the energy and continuity equations, and was supplemented by the k - ε model of turbulence.

In studying the aerodynamics and heat transfer of a single high-temperature jet interacting with the surface, the main determining quantities were: the velocity of nitrogen outflow from the nozzle U_0 , the nitrogen flow temperature T_0 , the temperature of the medium T_{cp} into which the jet flows, the inner diameter of the nozzle d_0 , the distance from the nozzle cut to the surface h , the distance from the critical point (the point of intersection of the axis of the jet with the surface) along the radius of the flow r .

Studies have shown that in calculating the processes of motion and heat transfer during jet convective heating of a metal, it is necessary to take into account the dependence of the viscosity of the gas on the temperature and on the ratio of the temperatures of the gas escaping from the nozzle and the temperature of the medium surrounding the jet.

Key words: jet flow, kinematic viscosity coefficient, flow turbulence, “attacking” jet, fan flow, numerical simulation, fields of velocity, Reynolds criterion, convective heating, convective heat transfer.

Формирование структуры течения и скоростных полей в струйной части потока и в веерном потоке при взаимодействии с ограничивающей поверхностью определяется, при прочих равных условиях, соотношением двух температур: температуры вытекающего из сопла газа T_0 и температуры среды T_{cp} , в которую струя вытекает. Сказанное является следствием того, что величина кинематического коэффициента вязкости газов существенным образом зависит от температуры [1].

Физически это может проявляться возможной сменой режимов движения в потоке, изменением сил вязкостного трения и, как следствие, изменением инжектирующей способности струи после истечения газа из сопла. Изменение аэродинамических характеристик струйной части потока в свою очередь определяет интенсивность конвективной теплоотдачи на границе раздела веерный поток – твердая поверхность [2].

Изменение температуры вытекающего из сопла газа и газа в веерном потоке вызвано различными причинами. В струйной части потока формирование температурных полей в поперечном сечении в основном определяется инжекцией газа окружающей среды в струйную часть потока, в веерном потоке – в основном процессами переноса теплоты от газа к нагреваемому материалу [3, 4].

Из вышесказанного следует, что при расчете процессов движения и теплообмена при струйном конвективном нагреве металла необходимо учитывать зависимость вязкости газа от температуры и от соотношения температур вытекающего из сопла газа и температуры среды, окружающей струю.

Интенсивность конвективной теплоотдачи при взаимодействии струй с поверхностью нагреваемого металла определяется аэродинамикой и тепловым состоянием газа в области веерного потока. На рисунке 1 и 2 представлена структура течения и скоростные поля для случая истечения азота из сопла круглого поперечного сечения с внутренним диаметром $d_0=50$ мм для случаев $h/d_0=5$ (конец начального участка струи) и $h/d_0 = 10$ при температуре азота на срезе сопла $T_0= 700$ °С и 20 °С. Начальная скорость истечения азота из сопла U_0 в обоих случаях была равна 30 м/с.

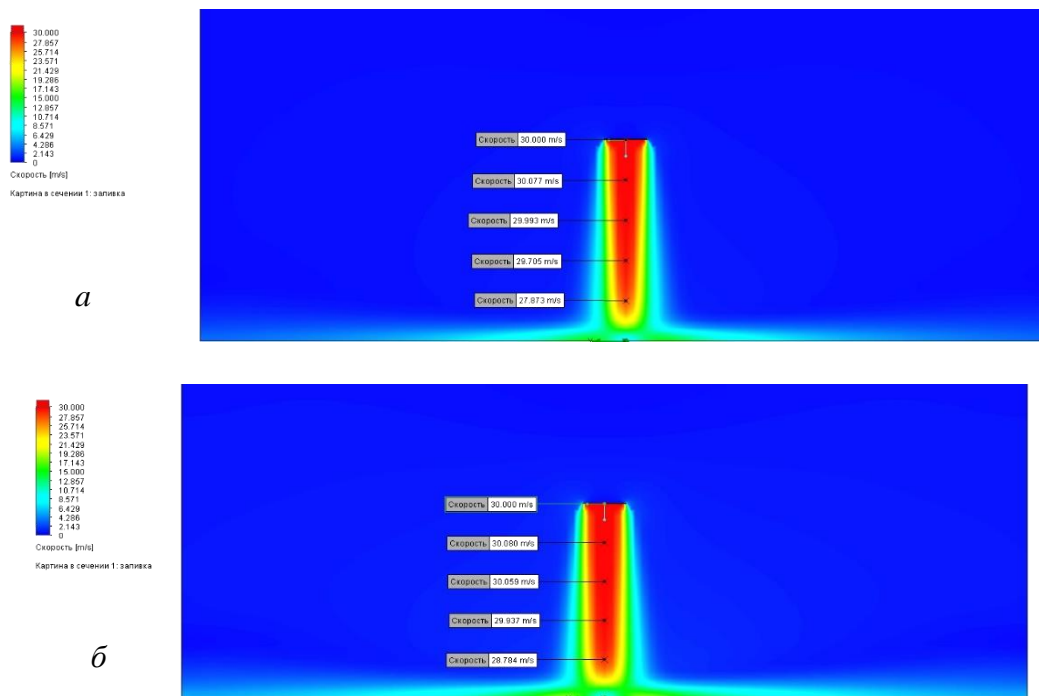


Рис. 1. Структура течения и скоростные поля при $d_o = 50$ мм, $h/d_o = 5$, $T_o = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б), $U_o = 30$ м/с

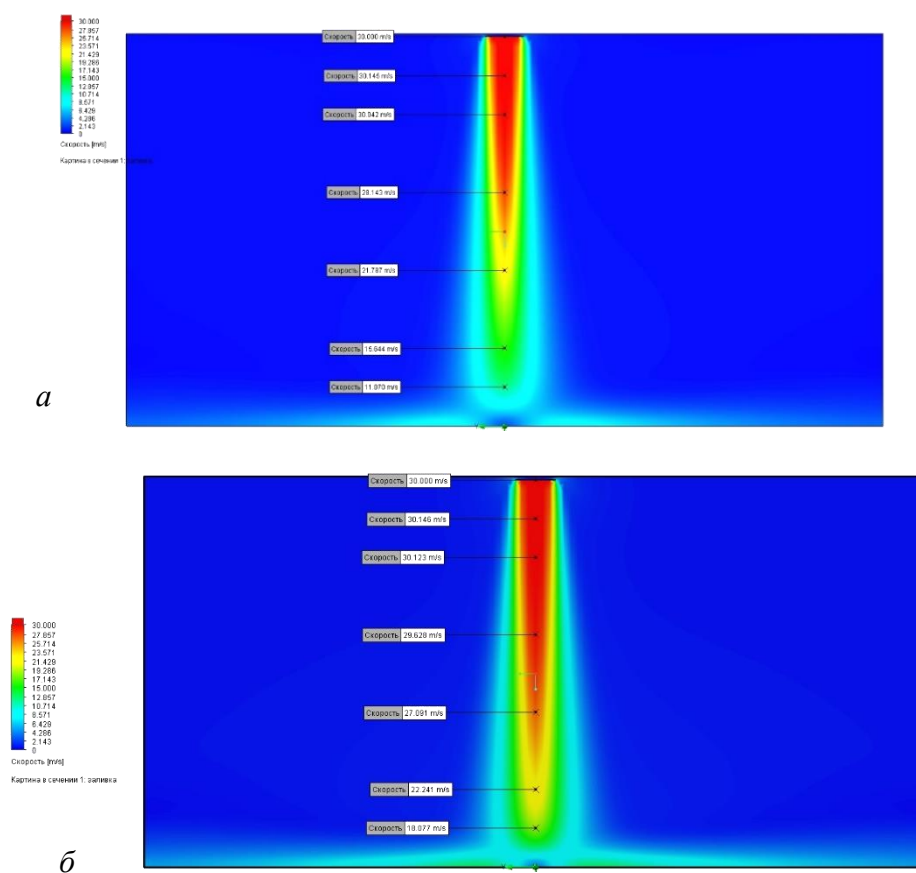


Рис. 2. Структура течения и скоростные поля при $d_o = 50$ мм, $h/d_o = 10$, $T_o = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б), $U_o = 30$ м/с

Как показали расчеты, температура вытекающего азота заметно сказывается на скоростных полях как в области струйного, так и в области веерного потока. Повышенная температура вытекающего из сопла газа приводит к более низкому темпу изменения скорости в приосевой области струи и, как следствие, к более высоким скоростям в области критической точки струи. Особенно это проявляется при малых значениях относительной высоты h/d_0 . При более высоких значениях этой величины ($h/d_0 \geq 15$) поверхность металла омывается азотом с существенно более низкими скоростями. Характерной особенностью для всех случаев является то, что толщина веерного потока мала по сравнению с величиной относительной высоты h/d_0 при различных начальных температурах вытекающего азота.

Особый интерес представляет анализ аэродинамических характеристик течения газа в области пограничного пристеночного слоя. На рисунках 3 и 4 приведены кривые распределения скорости течения азота по толщине пограничного слоя в сечениях при различном расстоянии от оси струи для случая одинаковой температуры вытекающей струи, равной 700 °С, и различной температуры азота вне струи. Приведенные кривые имеют выраженный максимум скорости вблизи поверхности.

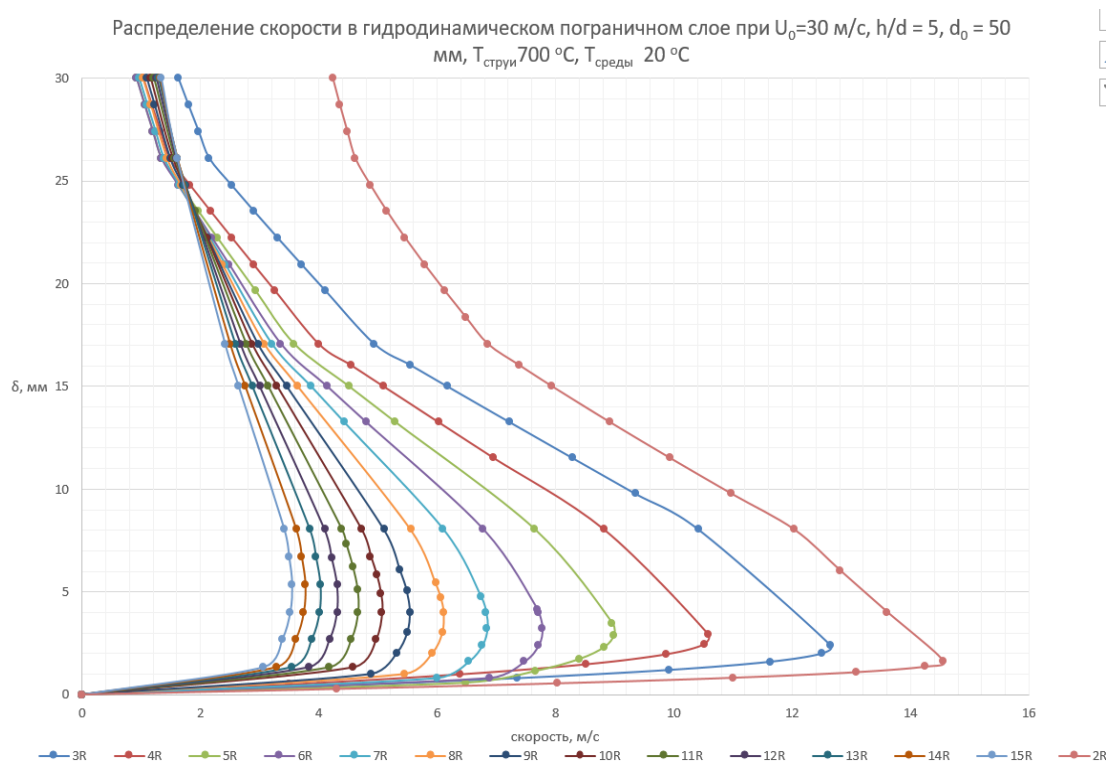


Рис. 3. Кривые распределения скорости течения азота по толщине пограничного слоя

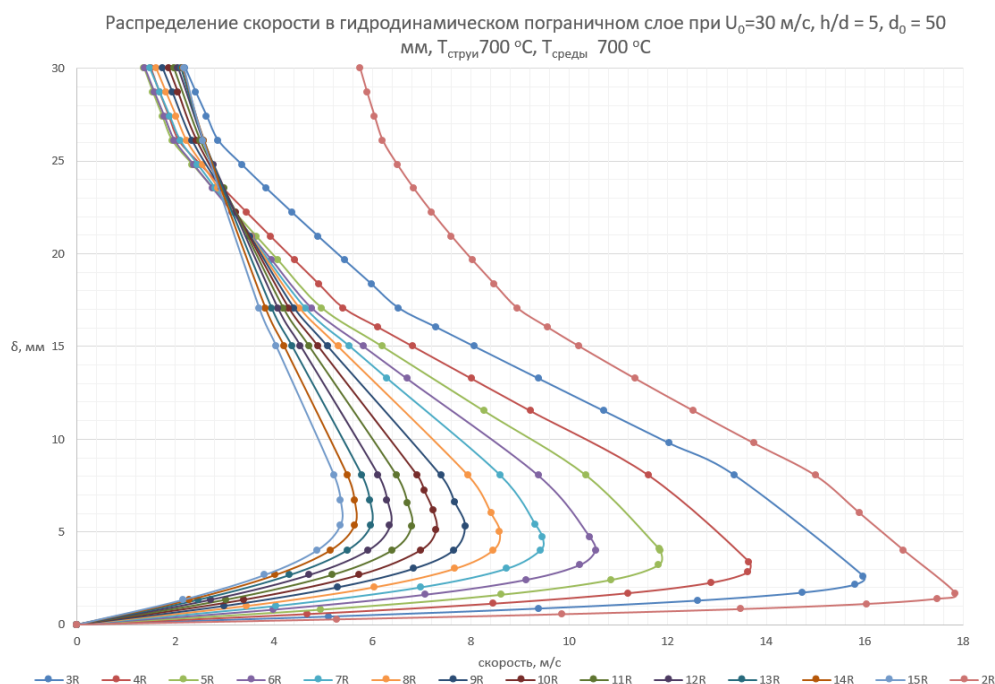


Рис. 4. Кривые распределения скорости течения азота по толщине пограничного слоя

Вблизи критической точки наблюдается самое высокое значение максимальной скорости, которое убывает вниз по течению веерного потока, при этом толщина пограничного слоя возрастает. Из-за малой толщины пограничного слоя скорость в его пределах изменяется практически по линейному закону. Повышение температуры вытекающего из сопла азота (рис. 4) увеличивает скорости его движения в пограничном слое.

Аналогичный характер изменения скорости в поперечном сечении пограничного пристеночного слоя имеет и при более высоких скоростях истечения азота из сопла, однако толщина пристеночного пограничного слоя уменьшается.

Изменение температуры среды $T_{\text{ср}}$ сказывается на распределении скорости в поперечном сечении струи. На рис. 5 и 6 представлены кривые распределения скорости в поперечном сечении струйного потока на различных расстояниях h от среза сопла ($h/d_0 = 10$, $d_0 = 50$ мм, $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $T_{\text{ср}} = 20; 700$ °С).

Видно, что при $h < 10$ мм эжектирующее действие струи проявляется весьма незначительно, область начального участка струи заметно выражена. При больших значениях величины h заметно наблюдается снижение осевой скорости, эпюры скорости сглаживаются. Повышение температуры среды до 700 °С снижает темп выравнивания эпюр особенно за пределами начального участка струи.

Характер изменения максимальной скорости в пристеночном пограничном слое в зависимости от расстояния от критической точки вниз по течению веерного потока показан на рисунке 7.

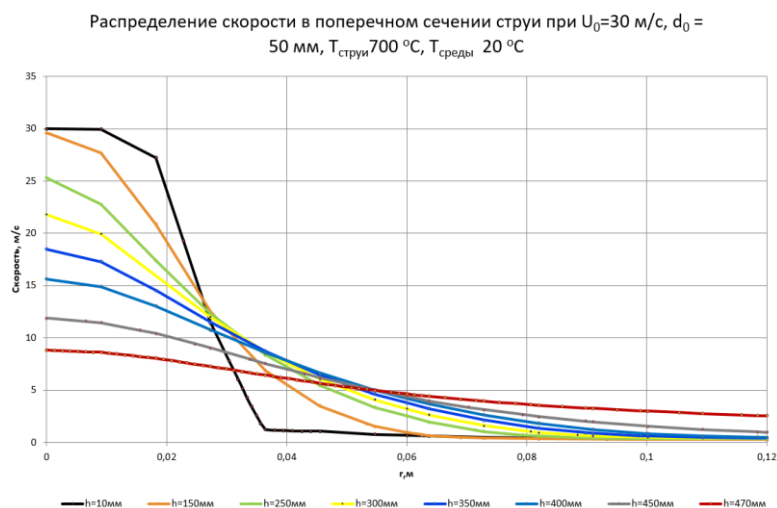


Рис. 5. Кривые распределения скорости в поперечном сечении струйного потока на различных расстояниях h от среза сопла

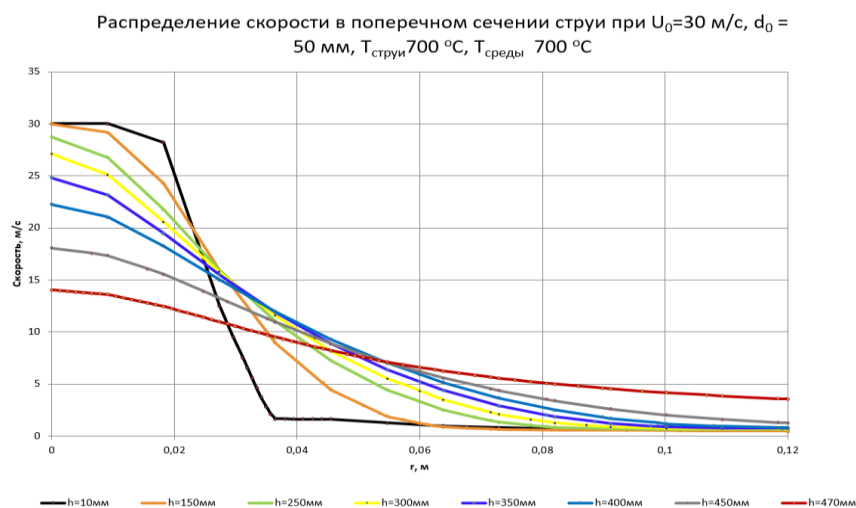


Рис. 6. Кривые распределения скорости в поперечном сечении струйного потока на различных расстояниях h от среза сопла

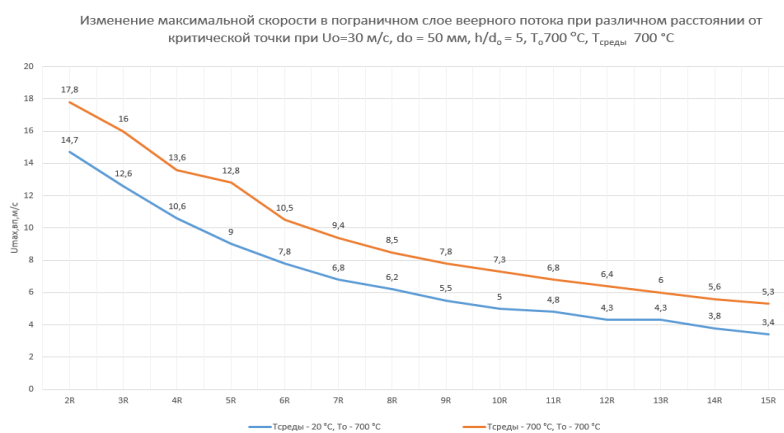


Рис. 7. Характер изменения максимальной скорости в пристеночном пограничном слое в зависимости от расстояния от критической точки вниз по течению веерного потока

Видно, что повышение температуры среды $T_{\text{ср}}$, в которую вытекает из сопла азот, значительно повышает максимальную скорость.

Существенное влияние температуры среды $T_{\text{ср}}$ проявляется для случая истечения струи в неограниченное пространство, т. е. в отсутствии ограничивающей поверхности (рисунки 8 и 9).

Скорость на оси струи в зависимости от расстояния при различной температуре среды, $h/d = 25$, $d_o = 50$ мм, $U_o = 30$ м/с

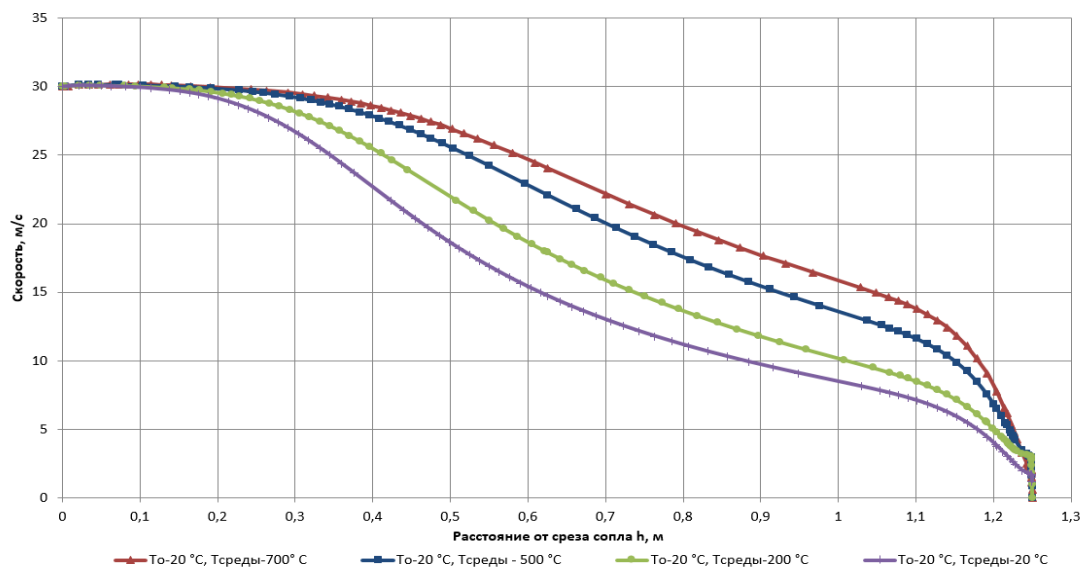


Рис. 8. Влияние температуры среды $T_{\text{ср}}$ для случая истечения струи в неограниченное пространство

Скорость на оси струи в зависимости от расстояния при различной температуре среды, $h/d = 25$, $d_o = 50$ мм, $U_o = 30$ м/с

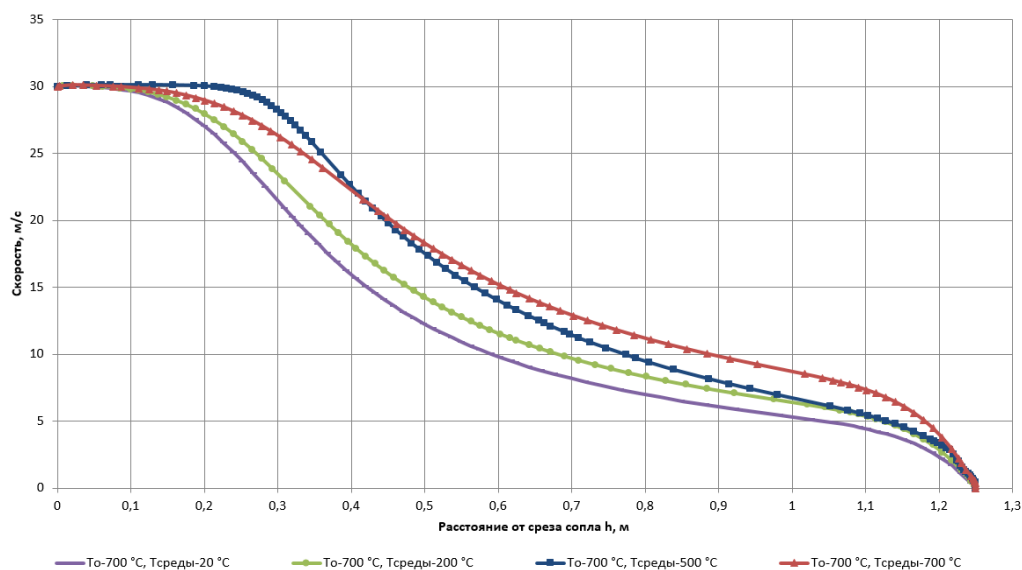


Рис. 9. Влияние температуры среды $T_{\text{ср}}$ для случая истечения струи в неограниченное пространство

Данные приведены для случая $U_0 = 30$ м/с, $d_0 = 50$ мм и изменения температуры T_0 и $T_{ср}$ в интервале (20...700) °С и показывают изменение только скорости на оси струи при различных расстояниях от среза сопла. Как видно, полное затухание струи наблюдается при $h/d_0 = 25$ (рисунок 9).

Таким образом при анализе аэродинамики струй, взаимодействующих нормально с ограничивающей поверхностью, необходимо учитывать температурный фактор. Его влияние сказывается через зависимость вязкости азота (газов) от температуры. Для азота, например, вязкость увеличивается на целый порядок (при 100 °С, $\nu_{N_2} = 13.3 \cdot 10^{-6}$ м²/с, при $T_{N_2} = 800$ °С, $\nu_{N_2} = 130,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с) [1].

Вязкость газа, наряду со степенью турбулизации потока, определяет инжектирующий эффект струйной части потока, т.е. степень вовлечения в движение неподвижной окружающей среды. Наиболее заметно этот процесс наблюдается, когда вязкости газа в струе и в окружающей среде максимальны.

Представленные на рисунке 7 кривые изменения максимальной скорости в пограничном слое веерного потока $u_{\max, \text{вп}}$ при различном расстоянии от критической точки струи ($h/d_0 = 5$, $d_0 = 50$ мм, $T_0 = 700$ °С, $U_0 = 30$ м/с) показывают, что при более высоких температурах окружающей среды $T_{ср}$ значения максимальной скорости выше, хотя характер кривых один и тот же.

Это хорошо иллюстрируется также данными, приведенными на рисунках 8 и 9 для струи, неограниченной по её длине. При этом вязкость проявляется по-разному при различных соотношениях температур T_0 и $T_{ср}$.

Если температура вытекающей струи газа T_0 ниже $T_{ср}$, то с ростом последней скорость на оси убывает медленнее по мере удаления газа от среза сопла (рисунок 8). При температуре вытекающего газа T_0 выше температуры $T_{ср}$ наибольший темп снижения осевой скорости наблюдается при низких температурах окружающей среды.

Список использованных источников

1. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методики расчета нагревательных и термических печей: учебно-справочное издание. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
2. Прибытков И.А. Энергосберегающие способы нагрева металла на основе использования струй // Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конф. «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». М.: МИСиС, 2002. С. 375-390.
3. Волков К.Н. Взаимодействие круглой турбулентной струи с плоской преградой // Прикладная механика и техническая физика. 2007. Т. 48. № 1. С. 55-67.
4. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Яковчук М.С., Взаимодействие высокотемпературных струй с охлаждаемой преградой // XVI Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование»: сборник материалов. 2016. С. 63-64.